第30卷 第5期
2016 年 5 月
材 料 研 究 学 报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH
Vol. 30 No. 5
May 2016

孔径对第三代镍基单晶高温合金DD33板式试样室温拉伸性能的影响*

周忠娇 刘 涛 张 功 王 莉 楼琅洪

(中国科学院金属研究所 沈阳 110016)

摘 要 本文研究了孔径(Φ=0.5、0.7及0.9 mm)对第三代镍基单晶高温合金DD33板式试样室温拉伸性能的影响。采用ARAMIS-光学动态应变测量系统原位观测了拉伸过程中不同孔径孔周围的应变分布, 并利用扫描电镜观察了拉伸试样的断口形貌。结果表明: 随着孔径的增大, 试样的屈服强度和抗拉强度均降低。拉伸过程中孔周围产生应变集中, 而且只在孔边很小的范围。弹性变形阶段, 孔边应变增长缓慢; 一旦发生塑性变形, 应变快速增长。孔径越大, 孔周围的应变集中越严重, 应变梯度越大。上述研究结果对理解含冷却孔单晶叶片的变形行为, 优化叶片结构, 从而提高叶片寿命具有重要意义。

关键词 金属材料, 材料的组织结构, 缺陷与性能, 室温拉伸, ARAMIS系统, 镍基单晶高温合金, 孔径, 应变

分类号 TG115.5+2 文章编号 1005-3093(2016)05-0343-05

Effect of Hole Diameter on Tensile Behavior of a Ni-base Single Crystal Superalloy DD33

ZHOU Zhongjiao LIU Tao ZHANG Gong WANG Li** LOU Langhong

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

*Supported by National Natural Science Foundation of China No. 51201164 and National High Technology Research and Development Program of China No. 2012AA03A511.

Manuscript received March 17, 2015; in revised form September 15, 2015.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (024)23971276, E-mail: wangli@imr.ac.cn

ABSTRACT Plate tensile specimens were machined from a Ni-base single crystal (SC) superalloy DD33, holes with various diameters were electrochemically machined (ECM) in the middle of the specimens. The strain fields around the holes during room temperature tensile tests were in-situ observed by an ARAMIS - optical deformation analysis system based on the digital image correlation (DIC) technique and the fracture surface was observed by scanning electron microscope (SEM). It was demonstrated that the yield strength and ultimate tensile strength decreased with the increase of hole diameter from 0.5 mm to 0.9 mm. Strain concentrated in the vicinity of the hole. The maximum strain increased slightly during elastic deformation. However, once plastic deformation began, it increased rapidly above its elastic value. In addition, the maximum strain and strain gradients adjacent to the holes increased with the increase of the hole diameter from 0.5 mm to 0.9 mm. This work is critical for understanding the crack initiation around the cooling holes with different diameters in the SC blade.

KEY WORDS metallic materials, microstructure, defects and properties for materials, tensile behavior, ARAMIS systems, Ni-base single crystal superalloy, hole diameter, strain distribution

航空发动机被誉为飞机的心脏, 涡轮叶片由于处于温度最高、应力最复杂、环境最恶劣的部位而被列为关键热端部件之一[1]。随着航空发动机的发展, 燃气进口温度越来越高, 叶片结构也日益复杂。薄壁多孔结构已成为目前先进航空发动机叶片的典型结构特征[2]。虽然冷却结构使叶片的工作温度明显降低, 但在温度、应力、气氛等复杂环境作用下, 疲劳裂纹会优先在叶片进气边的冷却孔周围萌生[3, 4]。而冷却孔影响裂纹萌生及扩展的机理仍不清楚。

在服役过程中, 应力和应变集中会产生在叶片冷却孔周围, 对性能产生很大影响。而且, 为了提高叶片冷却效果, 叶片不同位置冷却孔的孔径也不

* 国家自然科学基金51201164和国家高技术研究发展计划项目2012AA03A511资助。
2015年3月17日收到初稿; 2015年9月15日收到修改稿。
本文联系人: 王 莉
DOI: 10.11901/1005.3093.2015.131

同。目前, 孔径对孔周围的应力应变分布的影响规律尚无人报道。由于结构复杂, 关于孔边应力、应变分布的研究主要集中在计算模拟方面[5-8]。仅有的少数实验研究也主要采用只能得到标距段的平均应变的接触式变形测量方法, 如应变片、引伸计等[9, 10], 这些方法无法得到被测试样表面的全场应变分布。而且, 由于应变片或引伸计与被测试样表面直接接触, 对材料的强度有一定的影响。此外, 变形过程中引伸计易剥落而导致应变测量失效。

ARAMIS-光学动态应变测量系统是一种非接触式的应变测量方法。它是以数字图像相关技术为基础, 通过处理变形前后被测物体表面随机分布的人工或自然散斑场的灰度信息而得到应变信息的一种光学测量方法。它具有以下优点: (1) 样品准备简单; (2) 测量范围大: 从1 mm至1000 mm, 可测应变从0.01%至100%, 可得到表面全场的三维变形及应变分布; (3) 完整的图形化测量结果: 结果由巨大的数据点组成, 可以更好地了解样品性能; (4) 具有高的效率及灵活性[11, 12]。因此, 本文采用ARAMIS系统原位观测了单晶高温合金板状样品孔周围的应变分布, 研究了孔径对样品室温拉伸性能的影响。

1 实验方法

本实验所用合金为含4%(质量分数)Re的第三代镍基单晶高温合金DD33, 采用真空感应炉冶炼母合金, 用液态金属冷却工艺制备了直径为18 mm、长为200 mm的[001]取向的单晶试棒。本实验用试棒偏离[001]角度均在3°以内。铸态试棒的热处理工艺为: 固溶处理: 1335℃/10 h, 空冷; 一级时效处理: 1150℃/4 h, 空冷; 二级时效处理: 870℃/24 h, 空冷。加工成拉力方向沿[001], 样品表面为(100), 厚度为0.5 mm的拉伸样品, 如图1a所示。为了消除孔加工过程中的材料损伤, 采用电化学方法(Electrochemical machining, ECM)在每个样品标距段中间分别加工一个孔径为0.5 mm、0.7 mm或者0.9 mm的孔(图1a)。为消除表面划痕对实验结果的影响, 加工好的试样经机械抛光获得光滑表面后再经电解抛光以消除表面残余应力。随后, 在样品表面喷涂随机分布的黑白斑点图案, 用于ARAMIS系统观测应变分布, 如图1b所示。本文中所有晶体的取向, 均采用电子背散射衍射技术(EBSD)确定。

拉伸试验是在岛津AG-2KNE万能实验机上进行的, 应变速率为1×10^{-4} s^{-1}。拉伸过程中采用ARAMIS系统原位观测样品表面的应变分布。之后, 采用扫描电镜观察样品的断口形貌。

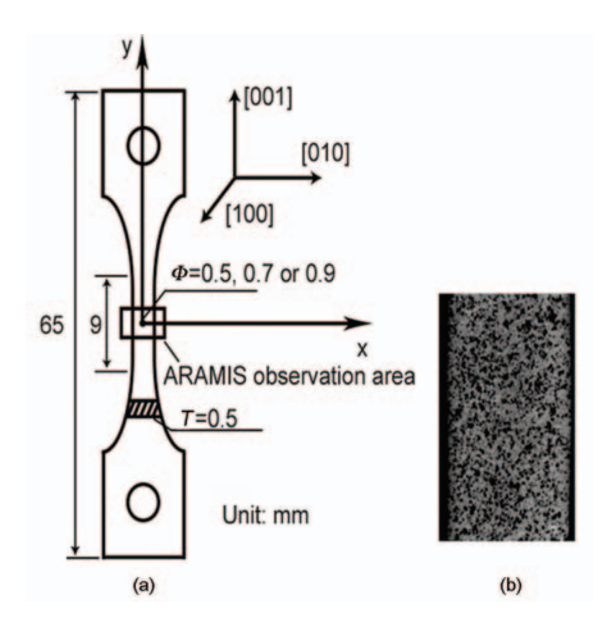


图1 拉伸样品示意图及用于ARAMIS观察的黑白斑点

Fig.1 Schematic of the thin-wall specimen for tensile test (a) and the black-white stochastic pattern for ARAMIS observation (b)

2 结果与讨论

2.1 不同孔径样品的拉伸性能

不同孔径样品的应力-应变曲线、屈服强度及抗拉强度的比较示于图2。本文中, 应力定义为拉伸载荷与净横截面积的比值, 即去除孔面积后的最小承载面积。可以看出, 含孔样品的拉伸曲线均无明显的屈服点, 而且样品屈服后出现明显的应变硬化现象, 见图2a。随着孔径由0.5 mm增大到0.9 mm, 样品的屈服强度约降低了7%, 抗拉强度则降低了4%, 如图2b所示。

2.2 不同孔径样品的应变分布

拉伸过程中, 采用ARAMIS系统原位测得的孔周围应变分布如图3所示。可以看出, 变形前, 样品表面无应变(图3b, f, j)。当拉伸应力达到屈服强度时, 变形只是集中在孔周围(图3c, g, k)。随载荷增大, 孔边应变集中区域沿±45°方向逐渐向样品边缘扩展(图3d, h, l)。很明显, 最大应变集中在孔边。而且随着孔径增大, 孔周围的最大应变值也增大。

当拉伸应力达到抗拉强度时, 离孔边不同距离处的应变分布如图4所示。可以看出, 在孔边很小的范围内(0.2 mm左右), 应变值要明显高于稍远于孔边的区域。比较不同孔径样品的应变分布数据, 可以发现当孔径由0.5 mm增大到0.9 mm时, 孔边的最大应变由13.42%增大到39.84%, 孔边应变梯度也大幅度提高。

拉伸过程中, 统计平行于拉伸方向的孔边处,

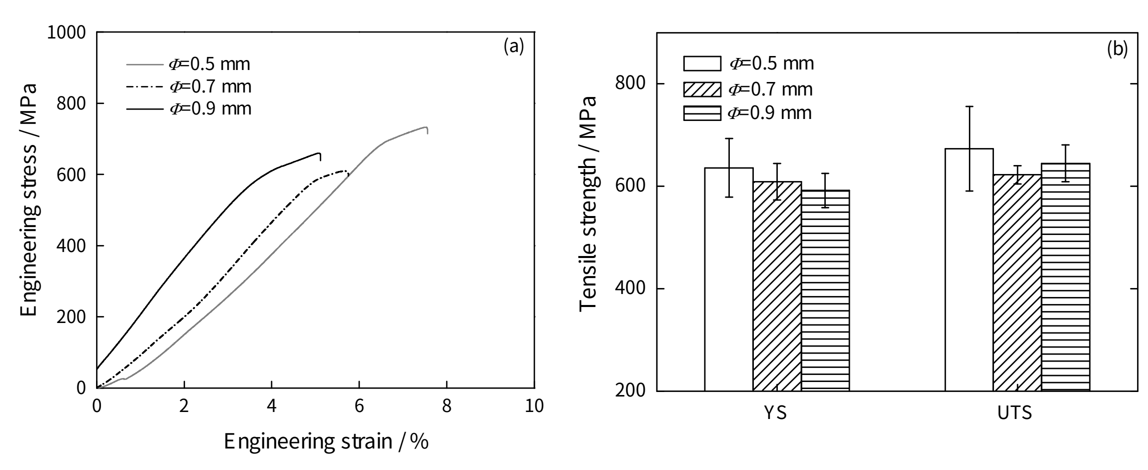


图2 不同孔径样品的应力-应变曲线以及屈服强度和抗拉强度的比较

Fig.2 The comparison of stress-strain curves (a), yield strength (YS) and ultimate tensile strength (UTS) (b) of specimens with a hole of different diameters

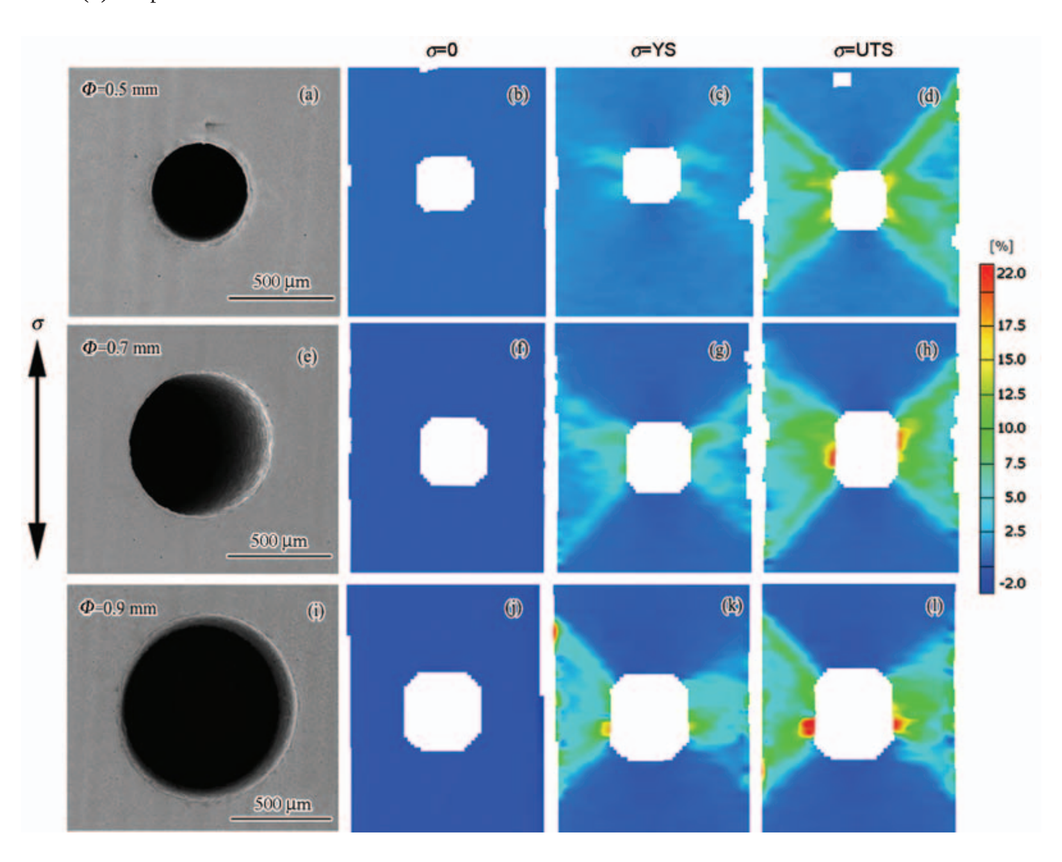


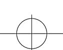
图3 拉伸过程中不同孔径孔周围的应变分布

Fig.3 Strain distribution around holes of different diameters during tensile test obtained from the in-situ observation by ARAMIS system, (a)-(d) Φ=0.5 mm, (e)-(h) Φ=0.7 mm, (i)-(l) Φ=0.9 mm, (a)(e)(i) show the morphology of the holes, and the strain distribution during tensile test of initial stage without deformation (b) (f) (j), then loaded to YS (c) (g) (k), and UTS (d) (h) (l)

即图5中 x=R 处(R 为孔的半径)的应变变化, 可见弹性变形阶段, 孔边应变增长缓慢; 而样品发生塑性变形后, 孔边应变快速增长。而且塑性变形阶段, Φ0.9 mm的孔边应变增长速率明显高于 Φ0.5及0.7 mm的孔。

2.3 不同孔径样品的拉伸断口

由于样品结构的对称性, 孔边一侧样品的拉伸断口如图6所示。可以看出, 室温下, 样品拉伸断口呈现出类解理断裂特征, 主要由多个与应力方向成一定角度的断裂平面所组成, 存在许多解理台阶与河流花样。当孔径为0.5 mm时, 断口主要由相互交截的许多小平面组成(图6a)。随着孔径增大, 断口上小平面逐渐减少, 主要呈现出大平面特征(图6b, c)。



2.4 孔径对孔边应变分布的影响

假设在无限大宽板中间有一个半径为 R 的孔，在板两侧沿 y 轴方向施加拉应力 σ，如图7所示，则

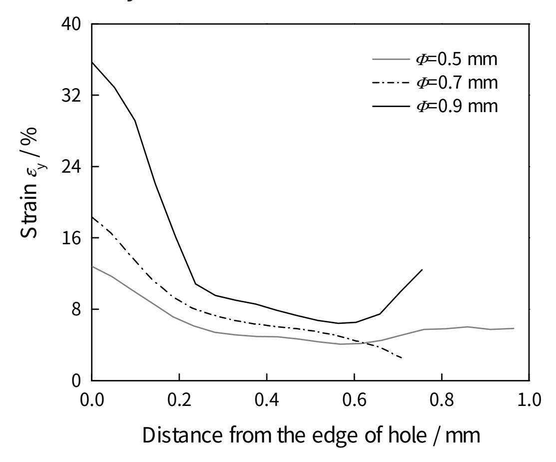


图4 σ=UTS时距孔边不同距离处的应变分布

Fig.4 The strain distribution from the edge of the hole when the samples were loaded to UTS

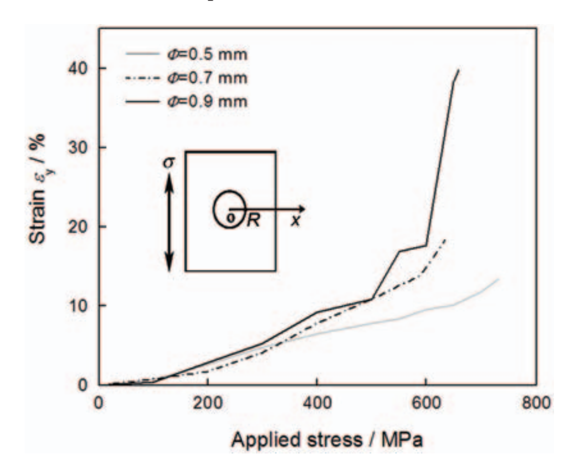


图5 拉伸过程中在平行于拉伸方向的孔边 $x=R$ 处的应变分布

Fig.5 The evolution of strain at $x=R$ during tensile test

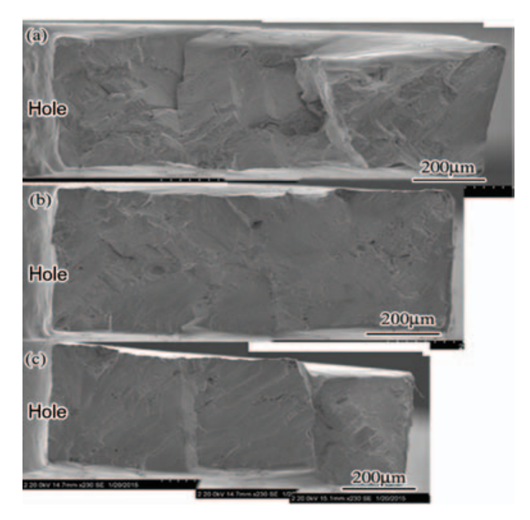


图6 含不同孔径样品的断口形貌

Fig.6 SEM micrographs showing the fracture surfaces of tensile specimens with a hole of (a) Φ=0.5 mm, (b) Φ=0.7 mm, (c) Φ=0.9 mm

在孔边，沿 x 轴的应力满足[13]

$$\sigma_{y(x,0)}=\frac{\sigma}{2}\{2+(\frac{R}{x})^2+3(\frac{R}{x})^4-[1+n-3][5(\frac{R}{x})^6-7(\frac{R}{x})^8]\}(x>R) \quad (1)$$

其中，$n=\sqrt{2(\frac{E_1}{E_2}-\upsilon_{12})+\frac{E_1}{G_{12}}}$，$E_1$、$E_2$ 分别为材料沿 x、y 轴方向的弹性模量，υ_{12}、G_{12} 分别为材料的泊松比和剪切模量。

Whitney 和 Nuismer[14]认为，在孔边存在一点，即 $x=R+d_0$ 处应力最大，若该点的应力达到抗拉强度 σ_b 时，即

$$\sigma_{y(R+d_o,0)}=\sigma_b \quad (2)$$

就会萌生裂纹。

将式(2)带入式(1)，可得孔边最大应力集中因子为

$$K=\frac{\sigma_{y(R+d_o,0)}}{\sigma}=1+\frac{1}{2}\xi^2+\frac{3}{2}\xi^4-\frac{(1+n)-3}{2}(5\xi^6-7\xi^8) \quad (3)$$

其中，$\xi=\frac{R}{R+d_0}$

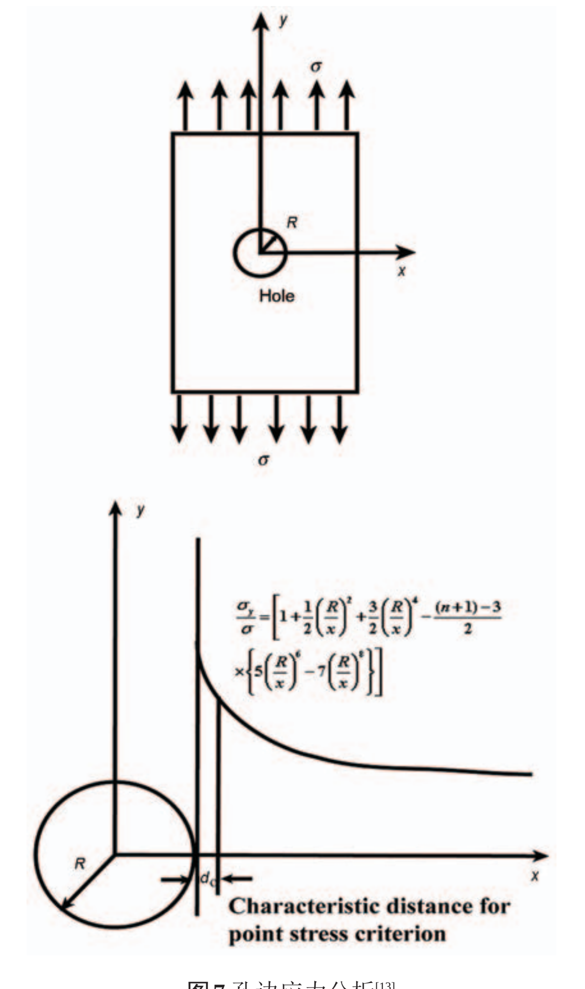


图7 孔边应力分析[13]

Fig.7 The stress in the vicinity of the hole

所以, 当孔径很大时, $\xi \to 1$, 此时, $K = 1 + n$ 。

当孔径很小(近似于无孔)时, $R \to 0$, $x \to 0$, 此时 $K = 1$ 。

很明显, 孔径越大, 孔周围应力集中越严重。大应力会导致大的变形量, 所以, 随孔径增大, 孔边的最大应变也增大。

根据应力方向与各个滑移系{111}面特有的空间关系, 可以推断样品断口上的解理面为{111}面。对于 Φ=0.9 mm的孔, 由于孔边应力较大, 裂纹在孔边快速萌生, 从而导致样品断裂, 表现为样品断口上主要为大解理面, 不同取向解理面交截较少(图6c)。而对于 Φ=0.5 mm的孔, 由于孔边应力集中程度较低, 样品能发生充分的塑性变形, 有更多的滑移系开动, 且滑移系间发生交互作用, 表现为样品断口上存在大量的相互交截的小解理面[15], 如图6a所示。

3 结　论

1. 孔径严重影响单晶高温合金的室温拉伸性能。随孔径增大, 样品的屈服强度和拉伸强度均降低。

2. 孔边应变集中只发生在很小的范围内; 弹性变形阶段, 孔边应变增长缓慢; 塑性变形时, 孔边应变快速增长。而且随着孔径增大, 孔边应变增长速度也增大。

3. 室温下, 样品拉伸断口呈现出类解理断裂特征。当孔径较小时, 断口上存在大量的小解理面, 并且不同取向的小解理面相互交截; 随孔径增大, 小解理面逐渐被大解理面所替代。这可能是由于拉伸过程中不同孔径的孔边具有不同的应力集中因子, 从而导致滑移系启动数量不同造成的。

参 考 文 献

1 CHEN Rongzhang, Review and prospect of developments of cast superalloys and technology of aeroengine turbine blade, Aeronaut. Manuf. Technol., **2**, 19(2002)
(陈荣章, 航空铸造涡轮叶片合金和工艺发展的回顾与展望, 航空制造技术, **2**, 19(2002))

2 E. Sun, T. Heffernan, R. Helmink, Stress rupture and fatigue in thin wall single crystal superalloys with cooling holes, Superalloys 2012, 351(2012)

3 A. Sugianto, R. J. Wardhana, N. Yulian, I. G. Kusuma, J. Wardana, M. Karokaro, H. Purwaningsih, Failure analysis of a first stage high pressure turbine blade in an aero engine turbine on PK-GSG Boeing B747-400

4 Z. Mazur, A. Luna-Ramírez, J. A. Juárez-Islas, A. Campos-Amezcua, Failure analysis of a gas turbine blade made of Inconel 738LC alloy, Eng. Fail. Anal., **12**, 474(2005)

5 E. Z. Stowell, *Stress and Strain Concentration at a Circular Hole in an Infinite Plate*, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 2073, Washington, 1950

6 L. H. Burck, C. A. Rau, Fatigue crack propagation from small holes in linear arrays, Int. J. Fract., **9**(1), 43(1973)

7 N. X. Hou, Z. X. Wen, Z. X. Du, Z. F. Yue, Crystallographic failure analysis of film near cooling hole under temperature gradient of nickel-based single crystal superalloys, Theor. Appl. Fract. Mech., **47**, 164 (2007)

8 Q. M. Yu, Z. F. Yue, Z. X. Wen, Creep damage evolution in a modeling specimen of nickel-based single crystal superalloys air-cooled blades, Mater. Sci. Eng. A, **477**, 319 (2008)

9 F. Ellyin, Experimental study of oblique circular cylindrical apertures in plates, Exp. Mech., **10**(5), 195(1970)

10 F. Ellyin, Elastoplastic strain distribution around an oblique aperture in plates, Exp. Mech., **13**(7), 305(1973)

11 F. Toussaint, L. Tabourot, P. Vacher, Experimental study with a Digital Image Correlation (DIC) method and numerical simulation of an anisotropic elastic-plastic commercially pure titanium, Arch. Civ. Mech. Eng., **8**(3), 131(2008)

12 S. H. Tung, M. H. Shih, J. C. Kuo, Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tension testing, Opt. Laser. Eng., **48**, 636(2010)

13 L. K. William, Stress concentration around a small circular hole in the HIMAT composite plate, NASA technical memorandum 86038, 1985

14 J. M. Whitney, R. J. Nuismer, Stress fracture criteria for laminated composite containing stress concentration. J. Comp. Mater., **8**, 253 (1974)

15 LI Jiarong, SHI Zhenxue, YUAN Hailong, LIU Shizhong, ZHAO Jinqian, HAN Mei, LIU Weiwei, Tensile anisotropy of single crystal superalloy DD6, J. Mater. Eng., **12**, 6(2008)
(李嘉荣, 史振学, 袁海龙, 刘世忠, 赵金乾, 韩　梅, 刘维维, 单晶高温合金DD6拉伸性能各向异性, 材料工程, **12**, 6(2008))

